

71 Anmelder:  
Siemens AG, 1000 Berlin und 8000 München, DE

72 Erfinder:  
Albrecht, Cord, 8520 Erlangen, DE; Massek, Peter,  
8550 Forchheim, DE; Salzburger, Herbert, 8520  
Erlangen, DE

54 Isolation um einen stabilisierten Supraleiter und Verfahren zu deren Herstellung

Ein stabilisierter Supraleiter mit annähernd rechteckigem Querschnitt ist von einer elektrischen Isolation umgeben. Die Isolation ist mit Aussparungen versehen, in denen ein ungehinderter Zutritt eines Kühlmittels an die Oberfläche des Supraleiters ermöglicht ist. Diese Isolation soll einfach herzustellen sein und bei hinreichender mechanischer Festigkeit eine gute Kühlung des Leiters ermöglichen. Hierzu sind in die den Supraleiter (3 bis 5) zunächst vollständig umgebende Isolation (9) nachträglich die Aussparungen (10a bis 10c) im Bereich zumindest einer der Seitenflächen (6a, 6b, 7a, 7b) des Supraleiters (3 bis 5) eingearbeitet. Zur Einarbeitung der Aussparungen kann vorteilhaft ein Laser-Strahl vorgesehen werden.

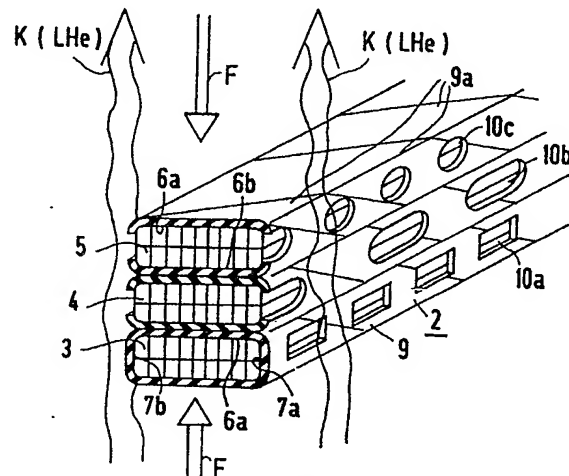


FIG 1

Die Erfindung bezieht sich auf eine elektrische Isolation vorbestimmter mechanischer Festigkeit um einen stabilisierten Supraleiter mit zumindest weitgehend rechteckigem Querschnitt, die mit Aussparungen versehen ist, in denen ein ungehinderter Zutritt eines Kühlmittels an die Oberfläche des Supraleiters ermöglicht ist. Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zur Herstellung einer solchen Isolation. Entsprechend isolierte Supraleiter sind z.B. aus der Veröffentlichung "IEEE Transactions on Magnetics", Vol. MAG-19, No. 3, Mai 1983, Seiten 189 bis 194 bekannt.

Mit supraleitenden Wicklungen lassen sich bekanntlich Magnetfelder mit magnetischen Flußdichten von z.B. über 1 Tesla (T) besonders vorteilhaft erzeugen. In solchen supraleitenden Wicklungen wird in vielen Fällen das Leitermaterial hinsichtlich seiner kritischen Stromdichte (Stromtragfähigkeit) besonders hoch ausgenutzt und/oder mechanisch besonders stark beansprucht. Es zeigt sich dann jedoch, daß die Wicklungen zu einem sogenannten "Training" neigen. Unter diesem Phänomen ist zu verstehen, daß die Leiter zunächst bereits bei kleinen Stromwerten in den normalleitenden Zustand übergehen. Sie müssen deshalb erneut auf Betriebstemperatur abgekühlt werden und erreichen den Auslegungswert ihres Erregerstromes erst nach einigen oder vielen Abkühlungs- und Erregerzyklen (vgl. z.B. "IEEE Transactions on Magnetics", Vol. MAG-17, No. 1, Jan. 1981, Seiten 863 bis 872). Als Hauptursachen für ein derartiges Training werden kleine lokale Energiedissipationen angesehen, die z.B. durch Leiterbewegungen oder Rißausbreitung im Struktur- oder Isolationsmaterial ausgelöst werden.

Typische Beispiele für hochausgenutzte, stark beanspruchte Wicklungen sind die rotierenden Feldwicklungen supraleitender Generatoren und die langgestreckten oder gekrümmten, oft nicht-planaren Teilwicklungen von Strahlführungsmagneten für die Hochenergiephysik. Zum Einsatz kommen hierbei vor allem verseilte, bisweilen auch massive Supraleiter, die im allgemeinen rechteckige oder nahezu rechteckige Querschnitte aufweisen (vgl. z.B. DE-OS 26 54 924 oder DE-PS 16 14 582).

Damit entsprechende Wicklungen mit solchen Supraleitern möglichst trainingsfrei betrieben werden können, muß die elektrische Isolation der verwendeten Leiter so ausgelegt und gestaltet sein, daß sie auch bei geringem Raumbedarf eine hohe mechanische Pressung bzw. Vorspannung zur Festlegung des Leiters im Wicklungsverbund zuläßt. Hierbei auftretende Kräfte liegen typisch im Bereich von 10 bis 30 N/mm<sup>2</sup>. Außerdem muß im Betrieb eine effektive Kühlung bei gleichzeitig zuverlässiger Isolation gewährleistet sein. Aus diesem Grunde sollte die Isolation wenigstens stellenweise einen Kühlmittelzutritt direkt zur Leiteroberfläche ermöglichen und Windungsspannungen zwischen benachbarten Leitern im Bereich von einigen 100 V und Spannungen gegen Masse typischerweise von mehreren kV zulassen.

Bisher wurden für rechteckförmige Supraleiter derartiger Wicklungen im wesentlichen folgende Isolationskonzepte verwirklicht:

a) Lackisolierte Massivleiter wurden beispielsweise durch eine Naßwickeltechnik oder eine Vakuum-Druckimprägnierung festgelegt. Hierbei wird zwar eine gute mechanische Fixierung der Leiter er-

reicht; jedoch ist die Isolation nur mittelmäßig. Auch ist die Kühlung der Leiter stark behindert.

b) Die Supraleiter werden mit Folien- oder Gewebebändern voll umbandelt, wobei gegebenenfalls Fixierharz mit verwendet wird. Hierbei ergeben sich jedoch dieselben Schwierigkeiten wie bei Konzept a).

c) Es wird auch eine Vollumbandlung mit Folienbändern vorgesehen, um die zusätzlich eine Schicht aus Gewebeband auf Abstand gewickelt wird. Auf diese Weise entstehen um den Leiter herum Kanäle für einen Kühlmitteldurchtritt. Dennoch sind hierbei nur eine mäßige Fixierung, mäßige Isolation und eine mäßige Kühlung zu erreichen.

d) Der Supraleiter wird ausschließlich mit starken, auf Abstand gewickelten Folienbändern umbandelt, so daß die Leiteroberfläche teilweise direkt vom Kühlmittel benetzt werden kann. Die Kühlung ist dementsprechend gut; jedoch können hierbei Fixierungs- und Isolationsprobleme auftreten.

e) Einem blanken supraleitenden Flachleiter wird beim Wickeln der Wicklung eine Windungsisolation in Form von vorgefertigten Streifen oder Formteilen beigelegt. Eine Flanken-Teilisolation erfolgt dabei in Kombination mit einer Nutauskleidung oder mit beigelegten Streifen. Hiermit werden zwar eine gute mechanische Preßbarkeit und auch eine ausreichende Kühlwirkung erreicht; jedoch ist die Isolation mäßig. Außerdem ist der Fertigungsaufwand insbesondere bei gekrümmten Wicklungen sehr hoch.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es nun, die Isolation der eingangs genannten Art dahingehend auszugestalten, daß sie auf verhältnismäßig einfache Weise herstellbar ist, wobei die bei den erwähnten Isolationskonzepten auftretenden Probleme zumindest weitgehend nicht gegeben sein sollen.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß in die den Supraleiter zunächst vollständig umgebende Isolation nachträglich die Aussparungen im Bereich zumindest einer der Seitenflächen des Supraleiters eingearbeitet sind.

Mit dieser Ausgestaltung der Isolation ergeben sich insbesondere die folgenden Vorteile: Ein Isolier-Lack oder eine umbandelte Isolier-Folie können allein nach Gesichtspunkten der Zuverlässigkeit der Isolation, der mechanischen Festigkeit bei der Fertigung und im Betrieb, sowie der Verarbeitbarkeit beim Wickeln und Biegen des Leiters ausgelegt werden. Dabei braucht vorteilhaft auf Kühlerfordernisse keine Rücksicht genommen zu werden. Hierbei können Kriechstrecken von Leiter zu Leiter deutlich größer als die doppelte Isolationsstärke ausgebildet werden, da die Isolation auf alle Fälle die Leiterkanten jedes Supraleiters umgreift. Die bei bekannten Konzepten vorgesehenen Kühloffnungen in Isolationsbändern können folglich beim Wickeln nicht auf der Leiteroberfläche verrutschen. Ferner bildet der Leiter mit seiner Isolation vorteilhaft eine robuste, vorgefertigte und vorprüfbare Einheit. Er kann auf einfache Weise verwickelt und verlegt werden. Außerdem ermöglicht eine große Variationsbreite der Ausführung der Isolation eine Anpassung an die jeweiligen Anwendungsfälle.

Ein vorteilhaftes Verfahren zur Herstellung der erfindungsgemäßen Isolation ist dadurch gekennzeichnet, daß die Aussparungen in die Isolation mittels eines physikalischen Prozesses, insbesondere mit Hilfe eines La-

ser-Strahles, eingearbeitet werden. Ein solcher Prozeß läßt sich ohne weiteres so steuern, daß eine unerwünschte Schädigung der Oberfläche des Supraleiters nicht auftritt.

Vorteilhafte Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Isolation bzw. des Verfahrens zu ihrer Herstellung gehen aus den Unteransprüchen hervor.

Zur weiteren Erläuterung der Erfindung wird nachfolgend auf die Zeichnung Bezug genommen, in deren Fig. 1 schematisch ein Supraleitersaufbau mit einer erfindungsgemäßen Isolation veranschaulicht ist. Fig. 2 zeigt schematisch als Ausschnitt die Herstellung von Aussparungen in einer solchen Isolation. In den Figuren sind übereinstimmende Teile mit demselben Bezugszeichen versehen.

Fig. 1 zeigt eine Schrägansicht auf einen Ausschnitt aus dem Aufbau einer supraleitenden Wicklung 2. Diese Wicklung enthält einen Stapel aus einzelnen Supraleitern 3 bis 5. Jeder Supraleiter hat eine etwa rechteckige Querschnittsform und somit zwei gegenüberliegenden Flachseiten 6a und 6b und zwei gegenüberliegenden Schmalseiten 7a und 7b. Um die Leiter ist jeweils eine elektrische Isolation 9 angeordnet, die eine hinreichende mechanische Festigkeit aufweisen soll und beispielsweise aus einem gewickelten Folienband 9a bestehen kann. In dieses Folienband sind erfindungsgemäß nachträglich im Bereich der Schmalseiten 7a und 7b Aussparungen 10a bis 10c z.B. verschiedener Form eingearbeitet, so daß Zonen zur direkten Oberflächenkühlung des jeweiligen Leiters entstehen. Das Abtragen des Folienmaterials bzw. das Einarbeiten oder Ausschneiden der Aussparungen geschieht dabei vorteilhaft mit an sich bekannten physikalischen Verfahren, bei denen z.B. Ultraschall oder eine elektromagnetische Strahlung eingesetzt wird. Diese Verfahren sind unter dem Gesichtspunkt auszuwählen, daß eine Schädigung des Supraleiters vermieden wird. Besonders geeignet erscheint deshalb der Einsatz einer Laserstrahlung vorbestimmter Intensität. Gemäß der dargestellten Ausführungsform der supraleitenden Wicklung 2 stehen so die Flachseiten 6a und 6b der supraleitenden Rechteckleiter 3 bis 5 zur Weitergabe von starken Preßkräften  $F$  über die Vollisolation an den jeweils benachbarten Leiter zur Verfügung. Unter einer Vollisolation wird dabei eine den jeweiligen Leiter vollständig umschließende Isolierung ohne besondere Öffnungen bzw. Aussparungen oder sonstige Zwischenräume verstanden. Vorteilhaft können so Preßkräfte  $F$  von mehr als  $10 \text{ N/mm}^2$  übertragen werden. Die Schmalseiten 7a und 7b (Leiterflanken) tragen die Aussparungen 10a bis 10c, die den ungehinderten Zutritt von flüssigem Helium (LHe) als Kühlmittel  $K$  an die jeweilige Leiteroberfläche ermöglichen. Diese Flankenkühlung durch eine Konvektion in dem Kühlmittel  $K$  ist durch gepfeilte Linien angedeutet.

Statt der in Fig. 1 veranschaulichten Stapelwicklung, die sich z.B. in einer Nut eines Generatorläufers befindet, kann die supraleitende Wicklung 2 auch eine andere Wicklungsform aufweisen. So kann sie beispielsweise als Scheibenwicklung oder als Lagenwicklung ausgeführt sein.

Bei den Leitern der supraleitenden Wicklung 2 handelt es sich um an sich bekannte Ausführungsformen von Supraleitern, die zumindest teilweise stabilisiert sind. Dabei ist dem supraleitenden Material des Leiters elektrisch und thermisch gut-leitendes Material wie z.B. Kupfer oder Aluminium beigelegt. Durch eine hinreichend intensive Kühlung dieses normalleitenden Materials läßt sich dann erreichen, daß eine normalleitend

gewordene Stelle im supraleitenden Material ohne Betriebsunterbrechung in den supraleitenden Zustand zurückgeführt werden kann. Entsprechende Supraleiter für die Wicklung 2 sind insbesondere als massive (monolithische), als verseilte oder auch als verröbelte Leiter ausgeführt.

Die erfindungsgemäße Isolation 9 läßt sich beispielsweise gemäß Fig. 1 mit Folienbändern 9a aufbauen. Dabei sind die Bandbreiten, Schichtzahlen und Überlappungsgrade weitgehend frei wählbar. Geeignete Folienmaterialien, die auch die Übertragung hinreichend großer Preßkräfte bei gleichzeitig guter elektrischer Spannungsfestigkeit ermöglichen, sind an sich bekannte Kunststoffe. Sie können beispielsweise spezielle thermoplastische Polyimide oder spezielle aromatische Polyamide sein, die z.B. unter dem Handelsnamen "Kapton" bzw. unter dem Handelsnamen "Nomex" bekannt sind.

Eine erfindungsgemäße Ausgestaltung einer elektrischen Isolation ist in Fig. 2 angedeutet. Hierbei sei ein supraleitender Rechteckleiter 5 zugrundegelegt, der aus mehreren verseilten Einzelleitern 12 aufgebaut ist. Jeder Einzelleiter enthält eine Vielzahl von supraleitenden Leiteradern 13, die in einer Matrix 14 aus einem stabilisierenden Material wie z.B. aus Kupfer oder Aluminium eingebettet sind. Um diesen Rechteckleiter 5 ist zunächst eine elektrische Vollisolation 9' mit einem Folienband 9a gewickelt. Anschließend werden dann in diese Vollisolation 9' einzelne (diskrete) Aussparungen 10c beispielsweise mit dem Strahl 16 eines Lasers eingearbeitet. Hierbei sind die örtliche Anordnung der einzelnen Aussparungen, deren Form, Größe und Anzahl in weiten Grenzen frei wählbar, wobei natürlich die auftretenden Preßkräfte und Spannungsverhältnisse sowie die Kühlanforderungen zu berücksichtigen sind. In der Darstellung der Fig. 2 ist angenommen, daß lediglich an der Schmalseite 7a (und entsprechend an der gegenüberliegenden, nicht dargestellten Schmalseite 7b) des Rechteckleiters 5 Aussparungen 10c vorgesehen werden sollen. Gegebenenfalls kann man aber auch an mindestens einer der Flachseiten 6a und 6b entsprechende Aussparungen ausbilden.

Gemäß einem konkreten Ausführungsbeispiel kann ein supraleitender Rechteck-Seilleiter 5 mit etwa 5 mm Dicke  $D$  und etwa 15 mm Breite  $B$  zunächst mit einer Vollisolation 9' aus  $50 \mu\text{m}$  starken "Kapton"-Bändern 9a oder aus  $80$  und  $250 \mu\text{m}$  starken "Nomex"-Bändern versehen werden. Mit einem  $\text{CO}_2$ -Laser der Nennleistung  $1 \text{ kW}$  lassen sich dann in diese Vollisolation kreisförmige Aussparungen 10c mit etwa  $2,5 \text{ mm}$  Durchmesser einschneiden, ohne daß es zu einem merklichen Anschmelzen des Materials der Matrix 14 kommt. Der  $\text{CO}_2$ -Laser kann hierfür folgende Daten haben: Strahldurchmesser  $0,15 \text{ mm}$ ; Strahlintensität  $6,7 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ ; Pulsdauer  $0,1 \mu\text{sec}$ , Pulspause  $3 \mu\text{sec}$ . Die mit einem entsprechenden Laserstrahl beaufschlagten Teilflächen der Folien 9a karbonisieren, wobei ein sehr feiner rußartiger Staub entsteht. Dieser Staub kann jedoch ohne weiteres abgesaugt oder abgewischt werden. Die ausgebildeten Schnittkanten sind dabei sauber und ohne Schmelzwulst.

Statt des beschriebenen  $\text{CO}_2$ -Lasers können selbstverständlich auch andere Lasertypen wie z.B. Excimer-Laser eingesetzt werden.

Gemäß dem dargestellten Ausführungsbeispiel wurde davon ausgegangen, daß die Herstellung der Aussparungen 10a bis 10c nach der Ausbildung der Vollisolation 9' und vor einem Aufbau einer supraleitenden Wicklung erfolgt. Gegebenenfalls ist es jedoch auch

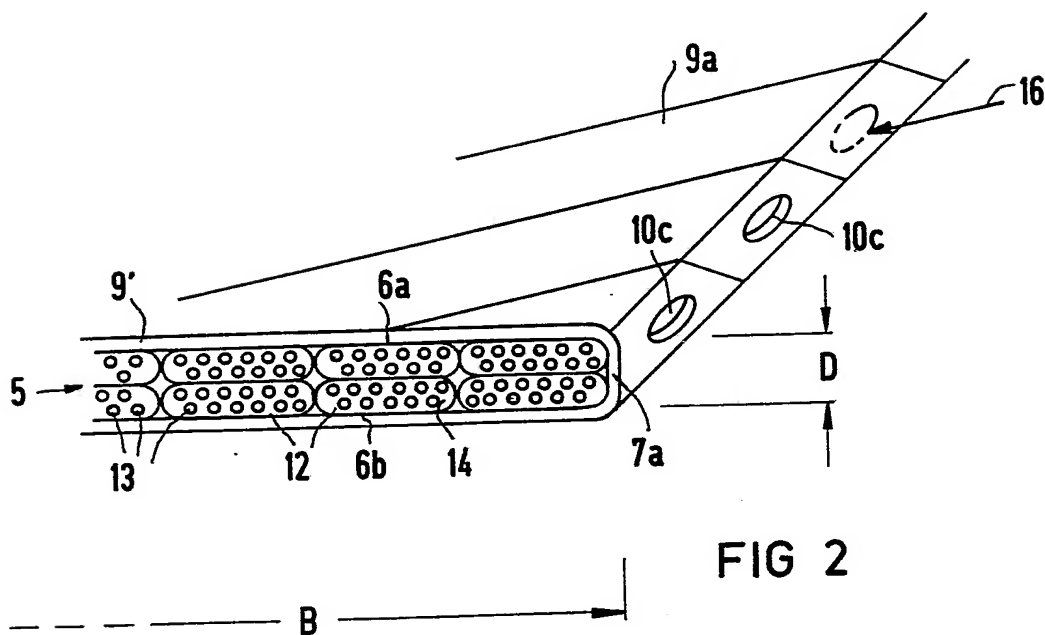
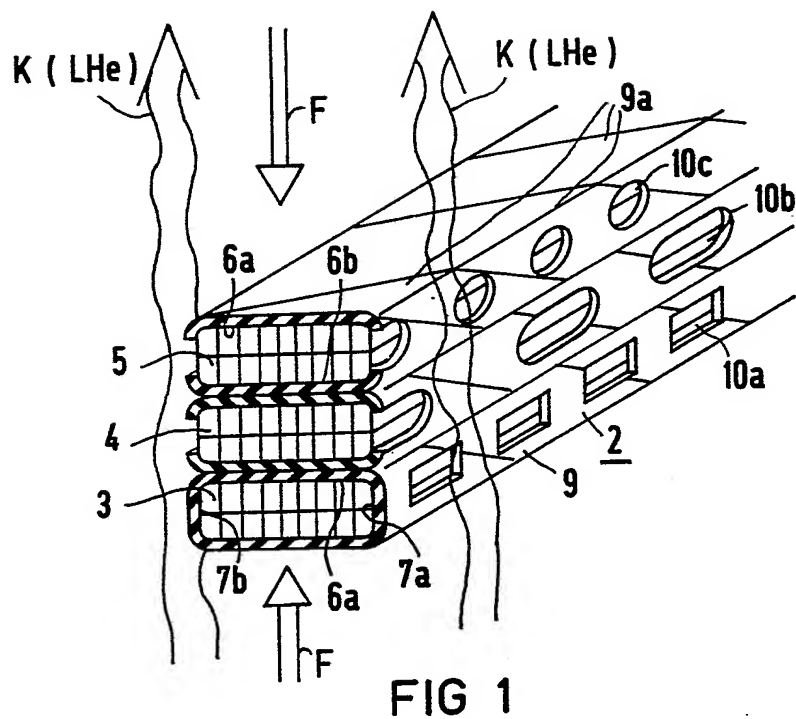
möglich, die supraleitende Wicklung mit Supraleitern aufzubauen, deren Vollisolation noch nicht mit den Aussparungen ausgestattet ist. In diesem Falle werden dann die Aussparungen erst nach dem Aufbau der Wicklung mit den Leitern, eventuell sogar nach einem Imprägnieren der Wicklung, in die Vollisolation der einzelnen Leiter von den freien Flächen der Wicklung her eingearbeitet. Eine solche Technik kann beispielsweise für Scheibenspulen vorgesehen werden, die z.B. als flankengekühlte Wicklungsmoduln ausgebildet sind.

#### Patentansprüche

1. Elektrische Isolation vorbestimmter mechanischer Festigkeit um einen stabilisierten Supraleiter mit mindestens weitgehend rechteckigem Querschnitt, die mit Aussparungen versehen ist, in denen ein ungehinderter Zutritt eines Kühlmittels an die Oberfläche des Supraleiters ermöglicht ist, dadurch gekennzeichnet, daß in die den Supraleiter (3 bis 5) zunächst vollständig umgebende Isolation (9') nachträglich die Aussparungen (10a bis 10c) im Bereich zumindest einer der Seitenflächen (6a, 6b, 7a, 7b) des Supraleiters (3 bis 5) eingearbeitet sind.
2. Isolation nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch eine Auslegung für Preßkräfte ( $F$ ) in Normalenrichtung auf die Flachseiten (6a, 6b) des Supraleiters (3 bis 5) von mindestens 10 N/mm<sup>2</sup>.
3. Isolation nach Anspruch 1 oder 2, gekennzeichnet durch eine Umwicklung des Supraleiters (3 bis 5) mit mindestens einem Kunststoffband (9a) oder durch einen Überzug des Supraleiters mit einem Kunststoffmaterial.
4. Isolation nach Anspruch 1 oder 2, gekennzeichnet durch einen Verguß des Supraleiters mit einem ausgehärteten Kunststoffmaterial.
5. Verfahren zur Herstellung der Isolation nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Aussparungen (10a bis 10c) mittels eines physikalischen Prozesses in die Isolation (9') eingearbeitet werden.
6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß zur Einarbeitung der Aussparungen (10c) ein Laser-Strahl (16) vorgesehen wird.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -



PUB-NO: DE003823938A1  
DOCUMENT-IDENTIFIER: DE 3823938 A1  
TITLE: Insulation around a  
stabilised superconductor  
and method of production  
thereof  
PUBN-DATE: February 1, 1990

INVENTOR-INFORMATION:

NAME	COUNTRY
ALBRECHT, CORD	DE
MASSEK, PETER	DE
SALZBURGER, HERBERT	DE

ASSIGNEE-INFORMATION:

NAME                      COUNTRY  
SIEMENS AG    DE

APPL-NO:      DE03823938

APPL-DATE: July 14, 1988

PRIORITY-DATA: DE03823938A (July 14, 1988)

INT-CL (IPC): B23K026/00 , H01B012/02

EUR-CL (EPC): H02K003/24 , H02K055/04 ,  
H01F006/06

US-CL-CURRENT: 219/121.72

## ABSTRACT:

A stabilised superconductor with approximately rectangular cross-section is surrounded by an electrical insulation. The insulation is provided with



holes, in which unimpaired access of a coolant to the surface area of the superconductor is made possible. This insulation is to be easy to prepare and is to allow good cooling of the conductor with sufficiently high mechanical strength. For this purpose, the holes (10a to 10c) are subsequently made, in the region of at least one of the side faces (6a, 6b, 7a, 7b) of the superconductor (3 to 5), in the insulation (9) which initially completely surrounds the superconductor (3 to 5). A laser beam may advantageously be provided for making the holes. □